

非球面检测误差分析和误差补偿策略研究

叶军君 兰 劲 郭隐彪
厦门大学,厦门,361005

摘要:针对非球面工件检测中的系统误差情况,通过分析各参数对工件形状精度的影响,提出了建立系统误差的数学模型解决测量误差的方案。应用计算机软件技术、误差理论及数据处理技术,完成了测量及数据处理系统软件编制,得到了有效消除工件表面测量误差的方法。对现有非球面工件进行误差测量及补偿的结果表明:所提出的解决测量系统误差的思路可行。

关键词:轴对称非球面;形状精度;数据处理;误差补偿;加工

中图分类号: TG76 **文章编号:** 1004—132X(2007)23—2793—05

Research on Error Analysis and Compensation of Aspheric Surface Measurement

Ye Junjun Lan Jing Guo Yinbiao
Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361005

Abstract: Aiming at the problem of systematic error in the measurement of the aspheric work-piece, which was resolved by analyzing the influence of each parameter upon the surface accuracy and developing the right mathematical model of system error. With the help of computer technology, error theory and data processing method, software was developed to deal with data measurement and data processing and a way was found to remove measurement error. By measuring an aspheric workpiece, and processing the measured data with error compensation method, the result shows that the method to resolve measurement error is feasible.

Key words: axisymmetric aspheric surface; surface accuracy; data processing; error compensation; processing

0 引言

近年来非球面光学部件在军用和民用产品上的应用越来越普及,非球面光学部件正向小型高精度化和大型高精度化方面发展。加工-检测-再加工-再检测是非球面加工的必经过程,然而在传统加工中,加工和检测是分别进行的,这样会产生因工件重复定位带来的定位误差,现多采用在线测量的方法来避免这一误差。但在线测量也不能消除因测量传感器定位自由度而引入的系统误差和机床的运动误差。通常通过标定实验,分离出对应自由度的系统误差去修正测量值^[1]。机床运动误差可采用双测头测量法,先通过两点法测量平面形状得出机床的运动误差,然后对测量非球面形状的另外一个测头的输出进行补偿以得出正确的非球面面形^[2]。

为了以现有的硬件设备条件达到更高的测量精度,本文对测量系统中各种影响因素进行建模分析。正确的误差分析,合理的检测方法,直观过硬的数据处理,是得到正确的非球面镜面形的有

力保证^[3]。

1 非球面的形状精度

光学非球面器件的形状误差要求在几到几十厘米的范围内达到 $1\mu\text{m}$ 以下。但现有的加工工具、加工工艺及加工设备常常无法保证更小或更大尺寸的产品达到高精度。这主要是由于下列原因造成了设计形状与加工形状的差异^[4,5]: 机床的运动误差和切削刀具/金刚石砂轮的磨耗; 非球面中心和外围的不同加工条件; 切削刀具/磨削砂轮的形状测试误差; 加工形状的测试误差; 三维坐标系与加工点的漂移; 加工力引起的变形和加工热产生的热变形。

为消除这些因素的影响,使其形状误差与设计值的偏差达到 $1\mu\text{m}$ 以下,往往要利用被加工非球面工件的面形检测信息进行多次的误差修正和补偿加工,使其形状精度达到要求。本文主要讨论非球面检测中可能出现的误差及其对形状精度的影响。

2 误差分析和补偿

非球面工件的面形测定主要有接触式和非接

收稿日期:2006—10—08

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目
(8638042416);厦门大学创新团队项目;福建省科技重大专项

触式两种方式,但无论采用哪种方式,在测量中存在的主要问题是处理好测量原点与切向偏移误差和测量坐标系与工件坐标系的偏角误差。采用接触式测量,当测量触针存在半径误差时,也会引入一定的误差,从而对面形的测定产生影响。

2.1 偏移误差

测量装置在安装时由于其主轴与工件主轴不重合,会产生偏移误差,即在 X 轴方向产生对中误差 X,此误差会对非球面面形的测定产生较大影响。由图 1 可知,被测点由 X 产生的 Z 轴方向的面形误差为

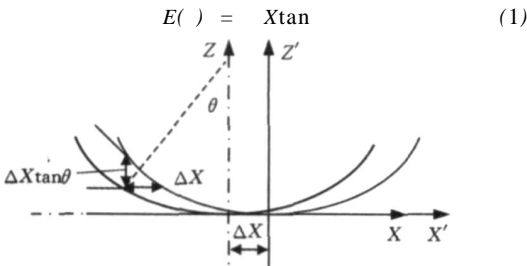


图 1 偏移误差对形状精度的影响

由式(1)可知,对于某个被测点,切线角 θ 是 45°,则面形误差随 X 的增大而增大,但一般在 0 到 45° 0 45° 范围变化。若 X 为定值,则面形误差随被测点切线角 θ 的增大而增大,即越靠边沿误差越大。

假定被测点切线角 θ = 45°,由式(1)可知,若工件的最大测定误差在 0.1μm 内,则 X 也必须控制在 0.1μm 内。

2.2 偏角误差

由于测量坐标系与工件坐标系存在偏角,所以会产生偏角误差,该误差也会对非球面面形的测定产生影响。由图 2 可知被测点由 θ 所产生的 Z 轴方向的面形误差为

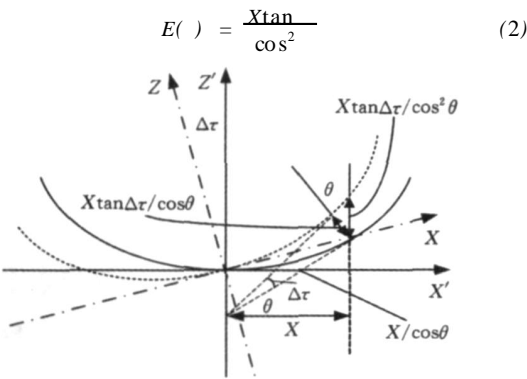


图 2 偏角误差对形状精度的影响

由式(2)可知,对于某个特定被测点(即 X 固定),面形误差随 θ 的增大而增大,而当 θ 值固定时,面形误差随被测点切线角 (0 45°) 的

增大而增大。

假定在 X = 100mm 处,被测点切线角 θ 为 45°,由式(2)可知,若工件的最大测定误差在 0.1μm 内,则 θ 必须控制在 5 × 10⁻⁷ (°) 内。实际中要把 θ 控制在这么小的范围内是很困难的,因此,如果不对偏角误差 θ 进行补偿,将会对形状精度产生很大的影响。

2.3 触针半径误差(接触式测量)

采用接触式测量方式时,当测量触针有半径误差 R 时,也会对面形的测定产生影响,由图 3 可知,被测点由 R 所产生的 Z 轴方向的面形误差为(假定顶点处误差为 0)

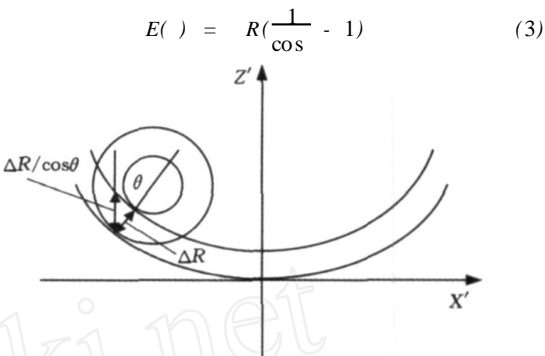


图 3 半径误差对形状精度的影响

由式(3)可知,对于某个被测点,面形误差随 R 的增大而增大;当 R 值固定时,面形误差随被测点切线角 (0 45°) 的增大而增大。

假定被测点切线角 θ = 45°,由式(3)可知,若工件的最大测定误差在 0.1μm 内,则 R 必须控制在 0.24μm 内。

2.4 误差补偿

在接触式测量中,测量所得数据为触针球心坐标值,测量示意图如图 4 所示^[3]。为了得到被测点的实际坐标值,必须对测量数据进行坐标变换,考虑触针半径误差 R 影响的变换公式为

$$\left. \begin{aligned} X_w &= X_o - (R + R) \sin \theta \\ Z_w &= Z_o - (R + R) (\cos \theta - 1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, X_o、Z_o 为触针球心坐标; X_w、Z_w 为被测点坐标; θ 为被测点切线角。

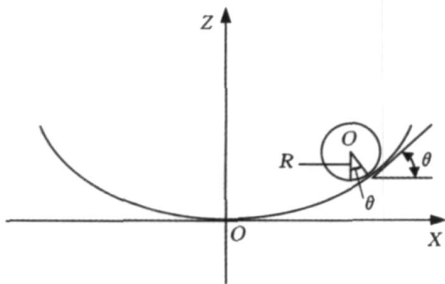


图 4 接触式测量示意图

无论是接触式还是非接触式测量方法,都可能存在切向误差 X 和偏角误差,误差补偿分析图如图 5 所示。在图 5 中, X 、 Z 为测量坐标系, X' 、 Z' 为经过旋转平移后的坐标系。由图 5 可得误差补偿公式:

$$\left. \begin{aligned} X_w &= X_w \cos \Delta r - Z_w \sin \Delta r - X \\ Z_w &= X_w \sin \Delta r + Z_w \cos \Delta r \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, X_w 、 Z_w 为误差补偿后的坐标。

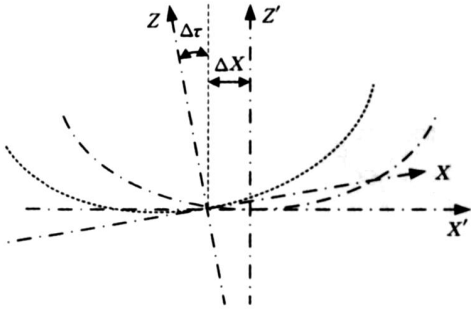


图 5 误差补偿分析图

经过误差补偿后,被测点实际的面形误差为

$$E = Z_w - Z_t \quad (X_w = X_t) \quad (6)$$

式中, X_t 、 Z_t 为被测点的理论坐标。

3 数据处理

本文所采用的测量系统如图 6 所示。磨削加工在线测量系统如图 5 所示。测得的误差信号通过 A/D 转换接口输入到工控机中,经微机处理后形成二次加工补偿数据。通过数据交换接口将补偿数据送入数控单元进行。采用的传感器是 KEYENCE LC - 2430。

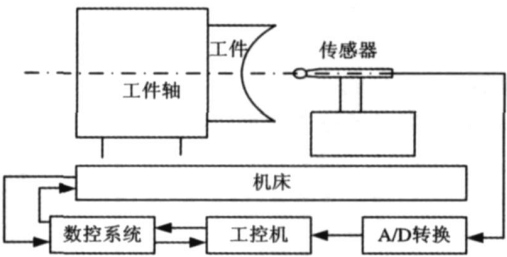


图 6 在线测量系统

一般的误差处理过程需要对测量原点和测量仪器进行多次的测量找正与调整,不仅重复性工作太多,容易引入人为误差和随机误差,而且有一些误差很不容易调到最佳值,动态误差更是难求准确^[3]。而通过正确地分析各种误差情况,建立合理的数学模型,采用现代计算机技术,编写程序对测量数据进行处理,即可得到不包含测量误差的测量数据,该数据与理论值的差即为加工误差。

3.1 数据预处理

在计算机中读入测量数据后,先对数据进行预处理。预处理主要包括剔除测量数据的奇异项和进行测量数据的平滑处理。测量数据中的奇异项是指采样数据序列中有明显错误(丢失或粗大)的个别数据。这些奇异项的存在,会大大增加数据处理后的误差,可采用一阶差分法剔除奇异项。

无论通过什么方式得到的曲线数据,往往叠加上有噪声,使得用测量的离散数据绘成的曲线多呈折线状,很不光滑。为削弱干扰的影响,提高曲线的光滑度,常常需要对测量数据进行平滑处理。采用五点三次法对测量数据进行平滑处理。

3.2 误差补偿处理

由于测量装置在安装中或多或少会引入偏移误差 X 和偏角误差 (接触式测量还可能引入 R),因此必须根据式(5)对测量数据进行坐标变换,然后由式(6)得出面形误差。因 X 、 R 不易由实验检测得出,所示借助于计算机技术,采用合适的算法编写程序,自动分离出测量误差 X 、 R 。

测量误差是误差因素 X 、 R 共同作用的结果,由式(1)~式(3)可知,对于第 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 个被测点,由测量引入的面形误差为

$$E(i) = X \tan i + \frac{X \tan i}{\cos^2 i} + R \left(\frac{1}{\cos i} - 1 \right) \quad (7)$$

由式(7)可知,由于 X 、 R 符号的正负性,不同因素引入的误差可能相互抵消或加强。

设 $X = a, \tan i = b, R = c, \frac{1}{\cos i} = T_i$, $\frac{X \tan i}{\cos^2 i} = S_i, \frac{1}{\cos i} - 1 = T_i$,则式(7)可改写为

$$E(i) = aR_i + bS_i + cT_i \quad (8)$$

设第 i 个被测点的实测面形误差为 E_i ($i = 1, 2, \dots, n$),可定义函数如下:

$$S(a, b, c) = \sum_{i=1}^n [E_i - (aR_i + bS_i + cT_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [E_i - (aR_i + bS_i + cT_i)]^2 \quad (9)$$

由最小二乘原理可知,要使 $S(a, b, c)$ 最小,则必有 $\frac{\partial S}{\partial a} = \frac{\partial S}{\partial b} = \frac{\partial S}{\partial c} = 0$ 成立,从而得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a} &= 2 \sum_{i=1}^n [E_i - (aR_i + bS_i + cT_i)](-R_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} &= 2 \sum_{i=1}^n [E_i - (aR_i + bS_i + cT_i)](-S_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial c} &= 2 \sum_{i=1}^n [E_i - (aR_i + bS_i + cT_i)](-T_i) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将式(10)整理成以 a 、 b 、 c 为未知数的线性方程组:

$$\left. \begin{aligned} a R_i^2 + b R_i S_i + c R_i T_i &= E_i R_i \\ a R_i S_i + b S_i^2 + c S_i T_i &= E_i S_i \\ a R_i T_i + b S_i T_i + c T_i^2 &= E_i T_i \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

解方程组即可得 a 、 b 、 c 的值,也就分离出了相应的测量误差 X 、 Y 、 R 。再根据式(5)、式(6)对坐标进行变换,即可得到消除了测量误差的测量数据。

当采用非接触式测量时, $R = c = 0$,同理可知,只需解式(12)即可得到 a 、 b 的值,分离出 X 、 Y 后,再根据式(6)对其进行坐标变换,即可得到消除了测量误差的测量数据。

$$\left. \begin{aligned} a R_i^2 + b R_i S_i &= E_i R_i \\ a R_i S_i + b S_i^2 &= E_i S_i \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

3.3 局部插值处理

通过对测量数据的预处理和误差补偿处理,得到了不含测量误差的非球面面形数据,该数据与理论数据的差即为面形误差。由于用于补偿加工的面形误差必须是各加工节点的面形误差,但因数据经过一系列变换后,所得数据不一定是各加工节点的测量数据,为了得到各加工节点的数据,需对数据进行插值处理。采用一元三点插值法对数据进行插值运算,得到各加工节点的面形数据,然后将其与理论数值进行差运算,差才是各加工节点的面形误差。由此得出的面形误差数据才可以用于指导非球面补偿加工。

4 软件实现及处理实例

4.1 软件实现

采用 VB.NET 来开发该数据处理程序,充分利用了 VB 在开发 Windows 应用程序界面的强大功能。代码编写采用模块化设计思想,对各个数据处理过程编写相应的数据处理模块,这样有利于程序的开发、调试及维护。各模块之间可进行信息交流,互相配合,以实现整体数据处理功能。

软件功能测试:编写调试完各处理模块后,采用渐增方式把模块整合到软件系统中去,然后对软件进行整体测试。

4.2 数据处理实例

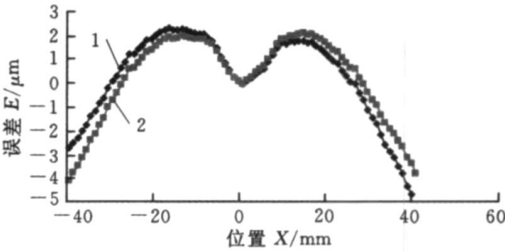
利用本程序对一组非球面工件单截面测量数据进行处理,测量参数如表 1 所示。表 2 为测量的部分数据,误差补偿前后的面形误差曲线如图 7 所示。

表 1 测量参数

测量方式	测量宽度(mm)	测量点数	测量间距(mm)
非接触式	8	81	0.1

表 2 测量的部分数据

X(mm)	补偿前(μm)	补偿后(μm)
0.5	0.88	0.75
0.7	- 1.25	0
1.4	0.31	0.56
2.4	- 1.25	- 0.56
3.1	- 2.63	- 1.94
- 0.5	- 1.69	- 1.88
- 0.9	0.46	0.38
- 1.5	0.44	0.69
- 2.6	- 0.50	- 0.75
- 3.4	- 2.38	- 2.81



1. 误差补偿后 2. 误差补偿前

图 7 误差曲线比较图

从图 7 可知,经软件进行数据处理后所得的误差曲线,有效地减小了测量误差对形状精度的影响,得到了更为真实的面形误差。实验结果表明该软件达到了预期的数据处理要求。

5 结束语

- (1)测量误差对非球面的面形精度有很大影响,对测量误差进行补偿,可以显著提高非球面的面形精度。
- (2)应用计算机技术开发程序对测量数据进行处理,优化了算法,数据精度高、计算速度快、成效显著。
- (3)程序设计中对不同格式的测量数据文件要编写不同的文件打开模块。可进一步扩展文件打开模块,处理由不同测量装置得出的测量数据文件。
- (4)数据处理后的实际面形误差(加工误差)对非球面的补偿加工起到很好的指导作用。
- (5)误差是非常复杂的,还有未被考虑到的误差因素存在,因此,综合考虑各种误差的算法和最终误差值的量化等仍有待进一步研究。

参考文献:

[1] Gao W, Kiyono S, Satoh E. Accuracy Measurement of Multi - degree - of - freedom Spindle Errors Using Two - dimensional Angle Sensors[J]. Annals of the CIRP, 2002 ,51 (1) :447-450.

四足机器人对称步态变换研究

余联庆^{1,2} 吴昌林² 马世平³ 陶卫军⁴

1. 武汉科技学院, 武汉, 430073 2. 华中科技大学, 武汉, 430074
3. 浙江师范大学, 金华, 321004 4. 南京理工大学, 南京, 210094

摘要:提出了一种四足机器人步态的时序分析方法,该方法使用 8 个参数来描述一般步态,得到了常用对称步态一个跨步周期中各腿着地和抬起的时间序列。匀速情况下具有相同负荷系数和不同步距的两种行走步态之间只需一个变换步态,用实例说明了变换步态中各腿着地和抬起的时间序列。制作了一个具有 12 个关节的小型四足机器人,并介绍了其控制系统的构成。按照时间序列来驱动其行走,结果表明该方法适用于四足机器人对称步态变换分析。

关键词:时间顺序分析;步态变换;对称步态;实验;四足机器人

中图分类号:TP242 **文章编号:**1004—132X(2007)23—2797—04

Study and Implementation on Gait Transition between Symmetrical Gaits in Quadruped

Yu Lianqing^{1,2} Wu Changlin² Ma Shiping³ Tao Weijun⁴

1. Wuhan University of Science and Engineering, Wuhan, 430073
2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074
3. Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang, 321004
4. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094

Abstract: A new approach of timing sequence analysis on the general gaits in quadruped was presented. Eight variables were employed to describe a general gait in this approach. The timing sequence of placing and lifting each leg in a stride cycle was achieved. Gait transition between symmetrical gaits with the same duty factor could be completed in one stride cycle under constant speed, and the timing sequence of placing and lifting each leg in the transition gait was illustrated through an example. An experimental quadruped which had twelve joints was built to test the validity of the approach. The quadruped was driven according the timing sequence. The experimental results show that the approach of timing sequence is suitable for the analysis of the gait transition between symmetrical gaits in quadruped.

Key words: timing sequence analysis; gait transition; symmetrical gait; experiment; quadruped robot

0 引言

人们对四足机器人的各种运动步态进行了大量的研究和实践^[1-4]。随着对步行机器人研究的不断深入以及人们对其性能期望的不断提高,两种步态之间的步态变换研究就显得十分重要和迫

切。目前研究步态及步态变换的工具均是基于一个跨步周期的支撑状态步态图。这种步态图能够清楚地反映每条腿在某时刻是处于支撑相还是悬空相,但是该方法没有反映各条腿的先后运动时序,在用于步态变换以及控制腿部运动时就显得比较复杂。基于上述考虑,本文提出了一种基于腿部动作先后顺序的步态分析方法,进行了常用

收稿日期:2006—09—29

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(Y104351)

[2] Yoshikazu A, Gao W, Hiroki S, On - machine Measurement of Aspherical Surface Profile [J]. Nanotechnology and Accuracy Engineering, 2004, 2(3):200-216.
[3] 张星祥,任建岳. 非球面镜检测误差的逆向求解法[J]. 航空精密制造技术, 2003, 39(6):26-30.
[4] 谢晋. 光学非球面的超精密加工技术及非接触检测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 94-98.

[5] 倪颖,余景池,郭培基,等. 小型非球面轮廓测量仪的原理及应用[J]. 光学精密工程, 2003, 11(6):612-616.

(编辑 何成根)

作者简介:叶军君,男,1962年生。厦门大学机电工程系副教授、博士。主要研究方向为检测及数控应用技术。兰 劲,男,1979年生。厦门大学物理与机电工程学院硕士研究生。郭隐彪,男,1962年生。厦门大学物理与机电工程学院教授。